해양구조물 적용을 위한 경량골재콘크리트의 기초물성에 관한 연구

김명식* · 장희석* · 김충호** · 백동일*

*부경대학교 토목공학과

**경성대학교 건설환경공학부

A Study of the Basic Properties of Lightweight Aggregate Concrete for Offshore Structures Application

Myung-Sik Kim*, Hee-Suk Jang*, Chung-Ho Kim** and Dong-Il Baek*

*Department of Civil Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**Department of Civil and Environmental Engineering, Kyungsoo University, Busan, Korea

KEY WORDS: Artificial light-weight aggregate 인공경량골재, Light-weight aggregate concrete 경량골재콘크리트, Compressive strength 압축강도, Splitting tensile strength 쪼갬인장강도, Modulus of elasticity 탄성계수

ABSTRACT: The various properties of concrete have been required, as civil engineering structures are getting larger and complicated. Therefore, the high performance of concrete, such as high strength, high fluidity, and low hydration heat, has been investigated largely. In this study, the properties of lightweight concrete-reducing self-weight of structure member have been studied in order to check the applicability of lightweight aggregate concrete to structural material. The experiments on compressive strength, splitting tensile strength, unit weight, and modulus of elasticity have been conducted with varying PLC, LWC I, LWC II, LWC II-SF5, LWC II-SF15 to check the basic properties. The compressive strength of 21MPa was obtained easily by using lightweight aggregate concrete and the addition of silica fume to increase the compressive strength slightly. To use lightweight aggregate concrete for civil engineering structures, systematic and rigorous studies are necessary.

1. 서 론

최근에 건설되는 콘크리트 구조물의 제작 환경은 점점 더 가혹한 환경속에서 건설되고 있다. 특히 해양 콘크리트 구조물의 경우 바람, 파도, 조류 등으로 발생하는 물리적인 외력과 해수에 포함된 황산염 및 각종 염화물에 의한 열화작용을 동시에 받기 때문에 재료의 선정에서 설계, 시공 및 유지관리가 매우 중요하다. 아울러 해상에 건설되는 콘크리트 구조물은 점점 대형화, 고층화됨에 따라 새로운 콘크리트 제조공법과 콘크리트 자체의 성능을 향상시키기 위한 연구가 중요한 과제로 대두되고 있다. 그러나 해양 콘크리트 구조물 공사에서 가장 어려운 문제 중 하나가 대형화, 고층화에 따른 구조물의 사하중 증대로 취급이 곤란하다는 점이다. 이러한 결점을 개선함과 동시에 여러 가지 우수한 성능을 부여하기 위하여 경량골재를 사용한 경량골재콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 외국에서의 경량골재콘크리트에 대한 연구는 오래전부터 활발하게 진행되어 현재는 비구조용뿐만 아니라 구조용으로도 폭넓게 사용되고 있다. 특히, 구조용 경량콘크리트에 대한 연구는 1950년대 후반 포틀랜드 시멘트협회에서 시작되었다. 이 연구의 일환으로 Shideler(1997)는 압축강도 8400psi를 가진 경량콘크리트의

제조와 특성에 대해 발표하였고, 일본토목학회(1985)에서는 인공경량콘크리트의 설계시공 매뉴얼을 편찬하면서 경량콘크리트의 전반적인 역학적 특성에 대해서 정리 요약하였다. 또한, Hoff(1994)는 해양구조물에 대한 고강도경량콘크리트의 피로거동에 대하여 발표하는 등 경량골재를 이용한 고강도 콘크리트를 제조하는 단계까지 진전되었고, 현장 구조물에 적용한 사례도 적지 않다(곽윤근과 장일영, 1998; ACI Committee 213, 2005). 그러나 국내에서는 천연골재가 비교적 풍부하였기 때문에 대체 골재에 대한 연구가 소홀한 편이었고, 겨우 20여년 전부터 관심을 갖기 시작하였다. 이 결과로 산업폐기물 등을 이용하여 수종의 인공경량골재를 개발하기도 하였으나, 그 수요가 많지 않고 연구실적도 드물어 그 적용 사례가 거의 없는 실정이다.

또한 국내의 연구 및 적용사례도 구조물의 자중감소보다는 단열 및 방음 등의 효과를 위한 비구조용으로 이용되어 왔다(신성우와 최명신, 1998). 현재는 그 필요성에 의해 콘크리트표준시방서(KCI, 2009)에 경량골재콘크리트 1종 및 2종으로 분류하고 설계기준강도와 단위용적질량의 범위, 품질에 관하여 규정하고 있다. 그러나 아직까지 구조용으로 시공된 사례는 많지 않고, 특히 날로 증가하는 해양에서의 건설공사에서 구조물의 경

량화시공이 시급한 형편이다(고경택 등, 2004).

따라서 본 연구는 우리나라가 삼면이 바다로 둘러싸인 해양 국가인 점을 고려하여 각종 해양구조물, 레저시설 등에 적합한 구조용 경량골재콘크리트를 제작하기 위한 연구로서 비교용으로 보통골재콘크리트를 제작하고 국내 콘크리트표준시방서에서 제시하고 있는 경량골재콘크리트 1종, 2종을 제작한 후 단위중량, 압축강도, 쪼갬인장강도 등의 기본적인 물리적 특성을 살펴보고 해양에서 건설되는 경량골재콘크리트 구조물의 설계와 시공에 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 실험 개요

2.1 사용 재료의 특성

2.1.1 결합재

실험에 사용한 시멘트는 KS L 5201에 규정된 국내 S사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고, 실리카흙은 중국산으로 분말도가 약 200,000cm²/g인 것을 사용하였다. 이들 결합재의 물리·화학적 성질은 Table 1에 나타내었다.

2.1.2 사용 골재

비교용으로 제작되는 보통골재콘크리트(PLC)와 1종 경량골재콘크리트(LWC I)에 사용된 잔골재는 김해지역에서 생산된 부순모래와 입도조정용으로 낙동세사를 7:3으로 혼합하여 사용하였고, 보통골재콘크리트에 사용된 굵은골재도 김해지역 석산에서 생산되는 25mm 쇄석을 사용하였다.

콘크리트표준시방서에서 정하고 있는 1종 경량골재콘크리트(LWC I)와 2종 경량골재콘크리트(LWC II)에 사용된 인공경량골재는 일본 태평양 머티리얼 주식회사의 아사노라이트를 사용하였다. 이들 사용 골재의 물리적 성질은 Table 2에 정리하였고, 인공경량골재의 입도분포곡선은 Fig. 1에 나타내었다.

2.1.3 혼화제

본 실험에 사용한 혼화제는 고성능 AE감수제로서 주성분이

Fig. 1 Grading curves of artificial light weight aggregate

Table 3 Properties of admixture

Type	Characteristic	Main component	Density
Super plasticizer	Soft yellow (Liquid)	Polycarbonic acid	1.04 ± 0.05

폴리카르본산계로 비중이 1.04이며, 연황색의 액상상태의 혼화제이다. 혼화제의 특성은 Table 3과 같다.

2.2 실험 계획

2.2.1 콘크리트 배합

본 실험의 배합조건은 보통골재콘크리트인 PLC를 기준으로 설계기준강도 21MPa, 물-시멘트비 40%, 잔골재율 43.95%, 단위시멘트량을 513kg/m³으로 일정하게 하였다. 또한 경량골재콘크리트의 제작은 콘크리트표준시방서에 준하여 경량골재콘크리트 1종의 경우는 굵은골재를 경량골재로 대체시키고, 2종의 경우는 잔골재와 굵은골재 모두를 경량골재로 치환하여 제작하였다. 그리고 경량골재콘크리트의 강도증진 효과를 높이기 위해 경량골재콘크리트 2종 배합에서 단위시멘트량의 5%, 15%를 실리카흙으로 중량비로 치환하여 제작하였다.

본 실험에 사용한 배합은 모두 5가지 배합으로 비교용으로

Table 1 Chemical composition and physical properties of binder

Type	Density	Fineness (cm ² /g)	Ig. loss (%)	Chemical composition (%)					
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
OPC	3.15	3,235	2.0	21.1	5.2	2.8	61.3	4.0	2.4
Silica fume	2.20	200,000	-	94.0	0.7	0.3	0.4	1.5	-

Table 2 Physical properties of aggregate

Type		Gmax (mm)	Density	Absorption (%)	F.M	Float ratio (%)
Common	Fine aggregate	-	2.62	1.80	2.75	-
	Coarse aggregate	25	2.62	1.16	6.83	-
Light weight	Fine aggregate	-	1.94	2.00	2.63	-
	Coarse aggregate	13	1.60	18.30	6.25	1.2

Table 4 Mixing design

Type	f_{ck} (MPa)	G_{max} (mm)	Slump (mm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	Unit content (kg/m ³)					
							W	C	S	G	SF	Admixture
PLC	21	25	120	4.5	40	43.95	205	513	666	856	-	-
LWC I								513	666	639	-	-
LWC II								513	413	639	-	-
LWC II-SF5	21	13	120	4.5	40	43.95	205	487	413	639	26	1.538
LWC II-SF15								436	413	639	77	1.538

보통골재콘크리트 한 종류와 4종류의 경량골재콘크리트를 제작하였으며, 배합설계는 Table 4에 나타내었다.

2.2.2 공시체 제작

콘크리트 배합방법은 50ℓ 강제식 믹서를 사용하여 시멘트와 실리카흙을 잔골재와 함께 투입하여 60초간 건비빔을 한 후 1차수를 투입하고 90초간 믹싱을 하였다. 이 후 2차수와 혼화제 및 굵은골재를 투입하여 150초간 믹싱하여 배출하였다. 배합 후 굳지 않은 콘크리트의 공기량과 슬럼프시험을 실시하였으며, 압축강도 및 쪼갬인장강도용 공시체를 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 실린더형으로 제작하였다. 제작된 모든 공시체는 성형 후 몰드를 제거하고 실험전까지 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도에서 수중양생을 실시하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 사용 골재의 물성시험

본 연구에 사용된 인공경량골재의 물성을 파악하기 위하여 KS에서 규정하고 있는 시험방법에 따라 시료의 채취, 체가름시험, 밀도 및 흡수율시험을 실시하였다. 슬럼프가 커질 경우 진동다짐시 가벼운 입자는 뜨기 때문에 부립률시험을 실시하여 골재의 적합여부를 판단하였다.

2.3.2 굳지 않은 콘크리트 시험

굳지 않은 콘크리트의 반죽질기, 연도, 점조성 및 작업성 등을 파악하기 위하여 슬럼프시험과 공기량시험을 KS규정에 준하여 실시하였다.

2.3.3 경화한 콘크리트 시험

1) 단위중량시험

단위중량시험은 다섯 종류(PLC, LWC I, LWC II, LWC II-SF5, LWC II-SF15)의 콘크리트를 제작하여 압축강도 측정용 공시체와 똑같은 방법으로 제작한 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 공시체를 수중양생시킨 후 재령 7일, 14일, 28일에 꺼내어 표면에 수분을 제거한 다음 중량을 측정하고 단위중량으로 환산하였다.

2) 압축강도시험

압축강도시험은 「KS F 2405 콘크리트의 압축강도시험 방법」에 준하여 실시하였으며, 다섯 종류의 콘크리트를 제작하여 재령 7일, 14일, 28일에 해당되는 공시체를 꺼내어 압축강도를 측정하였고, 측정값은 공시체 3개를 1조로 하여 평균값을 취하였다.

3) 쪼갬인장강도시험

쪼갬인장강도시험은 공시체의 건조 상태나 온도에 따라 상당히 변화하는 경우가 많으므로 양생을 끝낸 직후의 상태에서 「KS F 2423 콘크리트의 쪼갬인장강도시험 방법」에 준하여 실시하였다.

4) 탄성계수 계산

콘크리트의 탄성계수는 주로 콘크리트의 재료적 거동을 이해하기 위해서 사용되며, 배합에 사용된 골재의 종류에 크게 좌우된다. 콘크리트구조설계기준(KCI, 2007)에서 제시하고 있는 다음 식 (1)에 재령 28일에서의 단위중량과 압축강도를 이용하여 보통골재콘크리트와 경량골재콘크리트의 탄성계수를 계산하였다.

$$E_c = 0.077m_c^{1.5} \sqrt{f_{cu}} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단위중량 변화특성

경화한 콘크리트의 단위중량은 콘크리트의 강도, 열적특성, 탄성계수, 동결융해저항에 영향을 미친다. 콘크리트의 단위중량에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 골재의 단위중량이다. 일반적으로 콘크리트는 용적으로 70% 가량을 골재가 차지하기 때문이다. 따라서 경량골재를 사용한 콘크리트의 단위중량은 보통골재를 사용한 콘크리트에 비해 상당히 가볍다.

Fig. 2는 콘크리트의 종류에 따른 단위중량의 변화특성을 나

Fig. 2 Variation of unit weight according to concrete kinds

Fig. 3 Variation of comparison unit weight according to age

타낸 그림이고, Fig. 3은 재령에 따른 콘크리트 종류별 비교단위 중량(A/B*)을 나타낸 그림이다. 여기서 비교단위중량이란 보통 골재콘크리트의 재령별 단위중량을 기준으로 경량골재콘크리트의 단위중량을 비교한 것이다.

Fig. 2를 살펴보면 전체적으로 모든 종류의 콘크리트에서 재령증가에 따른 콘크리트의 단위중량 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. PLC의 경우 단위중량은 $2.3t/m^3$ 을 약간 상회하는 값으로 나타났다. 그러나 경량골재콘크리트 1종(LWC I)은 단위중량이 $1.95\sim 1.96t/m^3$ 정도이고, 경량골재콘크리트 2종(LWC II)은 $1.78\sim 1.79t/m^3$ 인 것으로 나타났다. 그리고 Fig. 3에서 보듯이 모든 재령에서 보통골재콘크리트에 비해 경량골재콘크리트 1종은 16%, 경량골재콘크리트 2종은 실리카흙 첨가와 상관없이 최대 24% 정도의 단위중량 감소효과가 있는 것으로 나타났다.

따라서 구조물의 지지부와 기초부의 단면을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 구조물에 배근되는 철근의 양도 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

3.2 압축강도 변화특성

본 시험에서 얻어진 다섯 종류 콘크리트의 재령별 압축강도 시험 결과를 Fig. 4~Fig. 6에 나타내었다. Fig. 4는 콘크리트 종류에 따른 재령별 압축강도의 변화특성이고, Fig. 5는 재령에 따른 각 콘크리트의 압축강도 변화특성이다. 그리고 Fig. 6은 보통골재콘크리트를 기준으로 경량골재콘크리트의 압축강도를 비교한 그래프이다. Photo. 1은 보통골재콘크리트와 인공경량골재콘크리트의 강도시험후의 파괴단면 사진이다.

본 연구에서는 설계기준강도를 21MPa로 예정하였으나 Fig. 4와 같이 실험결과 재령 7일부터 설계기준강도를 모두 만족하는 것으로 나타났고, 그 값은 21.75MPa~34.74MPa 범위의 수준으로 상당히 높은 압축강도를 발현하였다. 또한, Fig. 5에서는 LWC I을 제외하고 재령 증가에 따라 압축강도 또한 증가하는 경향을 보였다.

특히 Fig. 6에서 실리카흙 5%를 첨가한 경우는 재령 28일 기준으로 보통골재콘크리트의 압축강도 97%, 실리카흙을 15% 첨가한 경우는 보통골재콘크리트의 94% 정도로 나타나 실리카흙이 경량골재콘크리트의 압축강도 증대에도 상당한 효과가 있음

Fig. 4 Variation of compressive strength according to concrete kinds

Fig. 5 Variation of compressive strength according to age

Fig. 6 Variation of comparison compressive strength according to age

을 확인할 수 있었다.

보통골재콘크리트와 경량골재콘크리트의 강도차이는 Photo. 1을 참조하면 콘크리트의 파단면에서 분명하게 알 수 있었다.

보통골재를 사용한 경우 콘크리트파괴는 콘크리트와 시멘트

(a) PLC

(b) LWC

Photo. 1 Fracture section after strength test

풀의 경계면 분리에 의한 것이고, 인공경량골재를 사용한 콘크리트의 파괴는 골재입자와 시멘트풀과의 부착부분이 분리되기 이전에 골재 자체가 파괴되기 때문에 발생한다.

3.3 쪼갬인장강도 변화특성

콘크리트의 인장강도는 압축강도보다 훨씬 작는데, 그 이유는 콘크리트가 다공질 재료로 구성되어 있기 때문이다. 일반적으로 설계에서 콘크리트의 인장강도는 고려되지 않는다. 그러나 콘크리트의 균열은 대부분 재하중에 발생하는 인장응력 혹은

Fig. 7 Variation of splitting tensile strength according to concrete kinds

Fig. 8 Variation of splitting tensile strength according to age

Fig. 9 Variation of comparison splitting tensile strength according to age

환경의 변화에 기인하기 때문에 중요한 콘크리트의 구조성능이라고 할 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 콘크리트 종류 및 재령에 따른 쪼갬인장강도를 나타낸 것이고, Fig. 9는 재령에 따른 콘크리트 종류별 비교쪼갬인장강도를 나타낸 것이다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 모든 종류의 콘크리트는 재령이 증가함에 따라 쪼갬인장강도가 증가하는 것으로 나타났다. 재령 28일에서 PLC, LWC I와 LWC II는 비슷한 수준으로 나타났으나, 실리카흙을 첨가한 2가지 배합의 경우는 약간 낮은 값으로 측정되었다. 그 이유는 명확히 알 수 없으나 사용재료와 양생 등과 밀접한 관련이 있을 것으로 추측이 되며, 보다 정확한 분석을 위해 많은 데이터의 확보가 필요할 것으로 판단된다.

콘크리트의 인장강도는 골재와 모르타르의 인장강도 및 그들의 상호작용에 의존한다. 보통 경량골재콘크리트의 인장강도는 압축강도와 같이 보통골재콘크리트 인장강도의 70~100% 정도로 보는데 Fig. 9와 같이 본 실험에서도 LWC I 배합의 7일 강도(0.68)를 제외하고는 0.82~0.97 범위로 모두 만족하는 것으로 나타났다. 일반적으로 경량골재콘크리트는 모

Fig. 10 Comparison of specified design strength and splitting tensile strength

르타르의 균열이 발생하기 전에 골재의 인장응력이 한계에 도달하기 때문이며, 이런 이유로 인장강도는 낮게 나타나는 것이다.

우리나라 콘크리트구조설계기준(KCI, 2007)에서 경량골재콘크리트의 쪼갬인장강도에 대해 식 (2)와 같이 제시하고 있다.

$$f_{sp} = 0.57 \sqrt{f_{ck}} \quad (2)$$

Fig. 10은 콘크리트구조설계기준(KCI, 2007)에서 제시하는 식 (2)에 의한 계산값과 실제 쪼갬인장강도 실험값을 비교한 그래프이다. 초기 재령인 7일과 14일에서는 계산값이 실험값보다 약 13~36% 정도 높은 값을 나타내었고, 재령 28일에서는 계산값이 LWC I을 제외하고는 유사한 값을 보이거나 최대 15% 정도 크게 나타났다. 따라서 건조수축 및 온도변화 등에 의해 발생하는 균열의 경감이나 방지를 위해서는 좀 더 세밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

3.4 탄성계수 변화특성

탄성계수는 응력과 변형률에 관계되는 비례상수이며, 콘크리트 구조요소의 변형특성을 결정짓는 중요한 인자로 우리나라 콘크리트구조설계기준에서는 식 (1)과 같이 단위중량과 압축강도의 함수로 표시된다.

Fig. 11은 재령 28일에 콘크리트 종류별 비교탄성계수를 나타낸 그래프이다. 일반적으로 경량골재콘크리트의 탄성계수는 $(1.2 \sim 2.0) \times 104 \text{MPa}$ 의 범위이며, 보통골재콘크리트의 50~70% 정도인 것으로 보고되고 있다(정일영, 2004). 본 연구에서는 재령 28일의 단위중량과 압축강도 시험값을 식 (1)에 대입하여 계산하고, PLC와 4종류의 경량골재콘크리트의 탄성계수를 비교해 본 결과 보통골재콘크리트의 탄성계수에 대해 LWC I은 77%, LWC II와 LWC II-SF5는 67%, LWC II-SF15는 66% 정도인 것으로 나타났다. 콘크리트의 탄성계수는 식 (1)과 같이 콘크리트의 단위중량과 강도의 영향을 크게 받는다.

따라서 경량골재콘크리트의 탄성계수가 보통골재콘크리트보다 작은 것은 경량골재 자체의 강성이 작고, 단위중량이 상대적으로 가볍기 때문에 생긴 결과이다.

Fig. 11 Variation of comparison modulus of elasticity at 28 days

4. 결 론

본 연구는 해양 콘크리트 구조물 건설을 고려하여 보통골재 콘크리트와 4종류의 경량골재콘크리트를 제작한 후 각 콘크리트의 단위중량, 압축강도, 쪼갬인장강도, 탄성계수 등의 기초물성을 비교 검토하여 그 적용가능성을 살펴보았다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 경량골재콘크리트의 단위중량은 PLC에 비해 LWC I은 16%, LWC II 3종류는 24% 정도 자중 감소효과가 있는 것으로 나타나 해양콘크리트로 시공할 경우 취급이 상당히 용이할 것으로 기대된다.

(2) 경량골재콘크리트의 압축강도 발현은 재령 7일부터 설계 기준강도 21MPa를 만족하는 것으로 나타나 초기에 급격한 증가율을 보였다. 특히 LWC II-SF5는 PLC의 97% 정도로 나타나 PLC와 유사한 강도발현을 나타냄으로서 실리카흙이 압축강도 증진 효과가 매우 뛰어난 것으로 확인되었다.

(3) 경량골재콘크리트의 쪼갬인장강도는 골재의 특성상 모르타르의 크랙이 발생하기 전에 골재의 인장응력이 한계에 도달하여, 골재 자체가 파괴됨으로서 PLC의 쪼갬인장강도보다 낮게 나타났다. 그러나 재령 28일 기준으로 보면 PLC의 82~97% 수준으로 상당히 양호한 결과를 보였다.

(4) 쪼갬인장강도를 KCI에서 제시하는 식에 의한 계산값과 실험값을 비교해 본 결과 초기재령(7일, 14일)에서는 실험값이 13~36% 정도 높게 나타났고, 재령 28일에서는 LWC I을 제외하고는 유사한 값을 보이거나 최대 15% 정도 높게 나타났다. 따라서 건조수축 및 온도변화 등에 의해 발생하는 균열경감이나 방지를 위해 좀 더 세밀한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

(5) 경량골재콘크리트의 탄성계수는 PLC의 50~70%가 일반적이는데, 실험결과 LWC I가 77%, LWC II가 67%, LWC II-SF5는 67%, LWC II-SF15는 66% 정도로 일반적인 경우의 범위 이내로 나타났다.

(6) 위와 같은 결론을 토대로 단위중량을 감소시키면서 적정 설계기준강도를 만족하는 경량골재콘크리트 제작이 가능할 것으로 판단된다. 추후 해양환경과 관련된 각종 내구성 자료를 추가한다면 사후중 감소가 요구되는 해양콘크리트 구조물, 해양 레저시설 등의 다양한 분야에 적용이 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 고경택, 장일영, 김성욱, 이광명 (2004). "해양 콘크리트 구조물의 재료 및 시공", 콘크리트학회지, 제16권, 제6호, pp 26-30.
- 곽윤근, 장일영 (1998). "구조용 경량콘크리트의 연구동향", 콘크리트학회지, 제10권, 제4호, pp 5-15.
- 신성우, 최명신 (1998). "구조용 경량콘크리트의 적용사례 및 전망", 콘크리트학회지, 제10권, 제4호, pp 16-26.
- 일본토목학회 (1985). 인공경량콘크리트 설계시공 지침서.
- 정일영 (2004). 콘크리트구조 재료공학, 기문당, pp 420-431.
- 한국콘크리트학회 (2009). 콘크리트표준시방서, 한국콘크리트학회, pp 67-68.

- 한국콘크리트학회 (2007). "콘크리트구조설계기준", 한국콘크리트학회, p 154.
- ACI Committee 213 (2005). Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete, American Concrete Institute, pp 3-24.
- Hoff, G.C. (1994) "Observations on the Fatigue Behavior of High-Strength Lightweight Concrete", High-Performance Concrete, pp 785-822.

- Shideler, J.J. (1997) "Lightweight-Aggregate Concrete for Structural Use", ACI Journal, Vol 54, No 4, pp 299-328.

2010년 9월 2일 원고 접수

2011년 1월 13일 심사 완료

2011년 1월 14일 게재 확정